

WIAS Discussion Paper No.2011-008

**EV 普及に向けたバッテリー交換方式に関するモデル分析
ー安全在庫数に着目した支援インフラの運営形態評価ー**

**Analysis of an Electric Vehicle Battery Switching System Model
--Assessment of Infrastructure Support for Battery Switching and Supply Management--**

March 29, 2012

本間裕大（早稲田大学高等研究所）

Yudai HONMA
Waseda Institute for Advanced Study, Waseda University



WIAS

早稲田大学高等研究所
Waseda Institute for Advanced Study

1-6-1 Nishiwaseda, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8050, Japan

Tel: 03-5286-2460 ; Fax: 03-5286-2470

EV 普及に向けたバッテリー交換方式に関するモデル分析 —安全在庫数に着目した支援インフラの運営形態評価— ^{*1}

抄 録

近年，地球温暖化対策や石油依存からの脱却を目指し，電気自動車 (EV: Electric Vehicle) に改めて注目が集まっている．過去，EV の可能性が追及されたにも関わらず，普及に至らなかった最大の原因としては，バッテリーの性能限界が挙げられる．この問題に対し，”バッテリー交換方式” という新たな運営形態が，Better Place 社によって提案されている．ただし，当該方式を導入するためには，EV のバッテリーを交換するための”バッテリー交換ステーション”を整備し，かつ，そこにはある程度のバッテリー在庫を確保しておく必要がある．そこで本研究では，新たな EV の支援インフラとして，バッテリー交換ステーションに焦点を当て，バッテリー在庫という観点からその適切な運用形態を評価することを試みる．具体的にはバッテリー交換ステーション内における，バッテリーの在庫管理を待ち行列ネットワーク・モデルを用いて定式化した上で，バッテリーの呼損確率や安全在庫の導出方法について考察する．また，複数種類のバッテリーの考慮や，充電専用施設の導入などへの一般化も試みる．

JEL classification:

Keywords: 電気自動車, バッテリー交換方式, EV インフラ, 運営形態評価

Corresponding author. Tel.: +81-3-5286-2146

E-mail address: yudai@aoni.waseda.jp

^{*1} 本研究を進めるに当たり，数多くの貴重なコメントを下された (社) 日本オペレーションズ・リサーチ学会「持続可能社会のためのインフラストラクチャー戦略」研究部会の皆様に心より御礼申し上げます．

本研究は，科学技術人材育成費補助金 (テニユアトラック普及・定着事業) 『早稲田高等研究所テニユア・トラックプログラム』 (課題番号: A07167200)，ならびに科学研究費補助金若手研究 (B) 『電気自動車の社会的普及に向けた EV ステーションの整備・運用方策に関する数理的研究』 (課題番号: 23710183)，都市交通システムへの影響分析に関する数理的研究』の補助を受けました．

1 はじめに

20 世紀以降，人類は膨大な量の化石燃料を消費してきた．今日の繁栄は，この大量のエネルギー消費に支えられてきたと言っても過言ではない [8]．しかしながら，この過去 100 年における急激な消費は，同時にいくつかの問題を引き起こしている．

なかでも化石燃料の枯渇は，最も深刻かつ早急に対処すべき問題のひとつであろう [11]．特に，石油の枯渇は様々な機関あるいは科学者によって大きく議論されている．自動車産業を中心とした輸送業界でも現在，未だそのほとんどを石油に依存しているため，CO₂ 排出の削減と，石油依存からの脱却は特に深刻な問題となっている [5]．

そのような背景から近年，電気自動車 (EV: Electric Vehicle) に改めて注目が集まっている．そのアイデア自体は古くからあるにも関わらず，今日まで EV が普及しなかった背景には，いくつかの要因が考えられる．なかでも，バッテリー性能の限界による航続距離の短さと，その再充電に要する時間の長さは，大きな課題である [2]．

この問題に対し，“バッテリー交換方式”という新たな EV の運用形態が，Shai Agassi 氏率いる Better Place 社によって提案されている [10]．これは，EV のバッテリーを“充電”するのではなく，“交換”することによって，あたかもガソリン車の給油のように EV を支援しようというアイデアである．走行によりバッテリー残量が少なくなった際，それを充電しようとする時間がかるわけであるが，満充電されたバッテリーと交換するならば，わずかな停止時間で EV は利用可能となる．

ただし，上述のアイデアを導入するためには，EV のバッテリーを交換するための“バッテリー交換ステーション”を整備することが必須である．そして，そこには交換するための満充電済みのバッテリーが常に用意されていなければならない．

以上の観点から，本研究では，新たな EV の支援インフラとして，バッテリー交換ステーションに焦点を当て，バッテリー在庫という観点からその適切な運用形態を評価することを試みる．まず，第 2 章では，今日の EV が抱えている課題と，それに対するバッテリー交換方式の狙いを整理する．それを踏まえ，第 3 章ではバッテリー交換ステーション内における，バッテリーの管理を待ち行列

モデルを用いて定式化し，到着率等の変化に対する，安全在庫の必要数を考察する．第 4 章・第 5 章では，待ち行列ネットワーク・モデルを用いることによって，モデルの拡張を試みる．第 4 章では，バッテリー交換方式に，複数種類のバッテリーが存在する場合へとモデルを拡張し，当該想定が，バッテリーの呼損確率や安全在庫に如何なる影響を与えるか分析を行う．また，第 5 章では，複数のバッテリー交換ステーションや充電専用施設が互いに連携した際の包括的な数理モデルを提案し，その分析例を示す．また，本研究のまとめと今後の課題についても述べる（第 6 章）．

2 バッテリー交換ステーションとは

本章では，今日の EV が抱えている課題と，それに対するバッテリー交換方式の狙いを整理する．

2.1 電気自動車の現状

まず，今日における EV の技術水準について整理したい．前述の通り，これまで EV が普及しなかった要因には，搭載するバッテリーに関する種々の制約が挙げられよう．

近年ではリチウムイオン電池の開発や，ハイブリッド車の普及なども後押しし，極めて精力的にバッテリー開発が進められ，その性能向上は著しい．しかしながら，現在の EV でもなお，一回の充電で走れる連続航続距離は，せいぜい 100km ~ 160km 程度である．ガソリン車が一回の給油で 400km 以上走行することを考えると，これは不十分と言わざるを得ない．

また，ひとたび EV のバッテリーが空になれば，当然ながら何らかの手段で搭載バッテリーを満充電状態にする必要がある．ただし，単純にバッテリーを再充電しようとしても少なからず時間を要する．例えば，家庭用の 200V 電源では 6 ~ 8 時間近くかかるのが現状であるし，100V 電源になると 17 時間とも見積もられている．専用設備を用いた，いわゆる急速充電でも満充電の 80% 前後に戻すまで 30 分程度はかかる [4]．すなわちバッテリーを繰り返し充電する現状の方式に基づき，EV で長距離のトリップを行おうとした場合，現状では大体 120km 毎に 30 分程度，頻繁に停車しながら運転することになる．

バッテリー単体の価格も普及の妨げとなっていることは否定できない．現在の

EV では、バッテリー本体だけで 200 万円以上かかる．そのため、政府も EV 普及のために補助金を導入しているが、最大でも 139 万円であり (2010 年 3 月現在) [6]，結果として同等グレードのガソリン車に比べ、費用負担はかなり高価にならざるを得ない．

2.2 バッテリー交換方式の狙い

このように、現段階におけるバッテリーの性能限界は、EV の普及に対し大きな妨げとなっている．これらの問題点を、バッテリーの運用形態を変えることによって解決する試みが、Better Place 社による EV インフラ運動 “Project Better Place” で提唱されている “バッテリー交換方式” である [1]．

Better Place 社のビジネスプランでは、EV の残量が僅かなバッテリーと、満充電済みのバッテリーを “交換” することを提案している．これによって、ドライバーは、ごく短時間の停車によって、再び EV を利用することが可能となる．連続航続距離の短さ自体は変わらないものの、従来方式では少なからず要する充電時間の問題を解決することによって、EV でも不便なく長距離のトリップを行えることが期待できる．

また、交換方式を導入することによって、EV 本体とバッテリーを分離できることも注目である．Better Place 社では、各ユーザーにバッテリーを購入させるのではなく、リースする形式を提案している．これによって、(高価なバッテリーが含まれないので) 新車購入時の初期費用が抑えられることになる．

加えて、トラブルが起きたバッテリーや寿命が尽きたものを、最新型のバッテリーと容易に交換できるため、各ユーザーがバッテリーの技術進化の恩恵を、直ちに受けられる．他にも、専用設備でバッテリー充電や管理を行うため、各ユーザーが個別に管理するのに比べ、バッテリーの劣化を抑えられるといったメリットも考えられよう．このように、バッテリー交換方式の導入で、EV が抱えていた多くの問題点を緩和できることが期待されている．

2.3 バッテリー交換ステーションの整備

バッテリー交換方式を社会で導入するためには、その支援インフラとして “バッテリー交換ステーション” が必要となる．200kg 以上あるバッテリーをユーザーが自分で交換することは不可能なので、(ガソリンスタンドに相当する) バッテリー交換ステーションを訪れた上で、(燃料補給に相当する) バッテリー交換を

表 1 充電方式と交換方式の比較

項目	充電方式	交換方式
燃料補充にかかる時間	×	
新車購入時の初期費用		
バッテリー技術進歩の導入	×	
バッテリーの管理		
バッテリーに対する総費用		
支援インフラの規模		×

行う訳である．ここでステーションには，交換に応じる満充電済みのバッテリーが，常に用意されている必要があることに注意されたい．EV が連続して到着しても対処できるよう，多数の“予備バッテリー”が，在庫としてステーション内に保管されていることになる．

これらの事実は，視点を変えるとバッテリー交換方式の短所としても解釈されよう．すなわち，交換方式では上述のように予備バッテリーを準備する必要があるので，社会全体に存在するバッテリー数は，充電方式に比べ増加することになる．また，燃料補給ステーションの規模も，交換方式では充電方式に比べ大規模とならざるを得ないことは明らかである．これらの設備投資にかかる費用は，“短時間で燃料補給を行う”ための対価として，税金や交換費用など何らかの形で，各ユーザーが負担しなければならない．以上，従来から提案されてきた充電方式とバッテリー交換方式を，種々の項目について比較したものを表 1 にまとめる．

2.4 ステーションにおけるバッテリーの管理

これまでの議論から，EV の導入のために，バッテリー交換方式が有効であること，しかしながら，当該方式の導入に当ってはバッテリー交換ステーションを整備し，かつ適切な数の予備バッテリーを在庫として保管すべきことが明らかとなった．このような“予備バッテリー”がどれほど必要かは，EV の到着率やステーション設備の大小や運営形態，バッテリー性能など様々な条件に依存することは明らかである．このバッテリー交換ステーションにおける予備バッテリーの

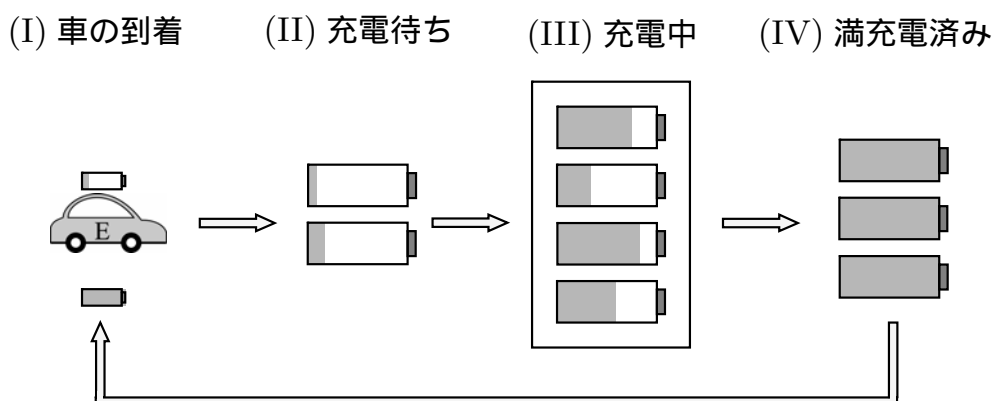


図 1 バッテリーの管理サイクル

安全在庫数を，待ち行列ネットワーク・モデルを用いて評価することが本研究の目的である．そこで，本章の最後として，バッテリー交換ステーションにおける幾つかのバッテリーの管理形態について考察を行いたい．

最初に，バッテリー交換ステーションにおける，バッテリーの管理サイクルについて整理する．車の到着によって行われることは，満充電済バッテリーと空バッテリーの交換である．このとき回収した空バッテリーは，(廃棄されることなく) 何処かで再充電された上で，新たな EV に搭載されるに違いない．以上の一連の流れにおいてバッテリーがどのように取り扱われるかを示したものが図 1 である．すなわち，(I) まず車の到着によって空バッテリーと満充電済みのバッテリーが交換される．そして，(II) 回収した空バッテリーは，充電設備が空くまで待機し，(III) 充電スロットが空き次第，充電を行うことになる．そのようにして，(IV) 充電が完了したバッテリーは交換用の満充電済みのバッテリー在庫として保管される．

バッテリー交換ステーションの運用形態を考察するに当り，最単純な形態として考えられるのは，以上のバッテリー管理サイクルが，完全にステーション内で閉じている場合である．すなわち，各ステーションが自前の充電設備を所有しており，回収した空バッテリーは各ステーション内で独立して再充電する形態である．この場合，例えば回収したバッテリーを充電専用施設などへ輸送し充電をしたり，あるいは充電済みのバッテリーを他の施設から調達したりすることは無い．当該形態は，本研究における基本モデルとして次章で分析する．

ここまで，バッテリーの種類については考慮に入れず，回収したバッテリーは，

他のどの EV にも取り付けられるものと暗に想定していた．しかしながら，様々なメーカーが EV を開発している現状を顧みるに，市場に出回る全ての EV についてバッテリーの共通化が達成されることは難しい可能性がある．このように社会に複数種類のバッテリーが存在する場合，ステーション側もそれに合わせて各種類ごとの予備バッテリーを持たなければならない．このように，複数種類のバッテリーが社会に存在する場合の運用形態については，第 4 章で分析を行う．

さて，各ステーションが自前の施設でバッテリーを充電し切れない場合についても，分析をしておくべきであろう．例えば，敷地に十分な余裕がない場合や，あるいはステーションのチェーン展開などの戦略面から，(他の場所にある) 充電専用施設にバッテリーを輸送して充電することは，十分に考えらる．この場合，複数のステーションが互いに影響を及ぼしあいながら，運営が行われることになる．このような複数ステーションと充電専用施設の“ネットワーク”を考慮した一般化については，第 5 章で考察したい．

3 基本モデルの定式化と安全在庫数の評価

本章では，バッテリー交換ステーションにおける運営形態を分析するために，待ち行列ネットワークに基づいた基本モデルを定式化し，また安全在庫数の評価を行う．本章で想定する運用形態は，各ステーションが独自に再充電を行い，バッテリーも 1 種類である，最単純なものである．

3.1 バッテリー在庫の分類

まず定式化に当り，バッテリー交換ステーションにおけるシステム状態を，如何に記述するかについて説明する．図 1 から明らかな通り，ステーション内には様々な状態のバッテリーが存在する．そこで本研究では，これら各々の状態のバッテリーがそれぞれ何本あるかによって，ステーション内のシステム状態が記述されるものとする．

いま，“充電待ち”と“充電中”のバッテリーを，満充電されていないという観点から統合し，“充電フェーズ”と呼ぶことにしよう．このときステーション内には，(i) 満充電済みと，(ii) 充電フェーズの，2 状態のバッテリーが存在することになる．ここで，各々の状態のバッテリー数を $x^{(i)}, x^{(ii)}$ と記述することにし，この 2 変数を以って，システム状態を記述するものとする．“充電待ち”と“充電

中”のバッテリーを区別しなくとも良い理由は，充電スロットが空いていれば，かならず充電することが自然なためであり，事実，ステーション内におけるバッテリー充電設備のスロット数（すなわち同時に充電できる本数）を s とすると，以下の関係式が成立することは明らかであろう：

$$\{ \text{満充電済み, 充電待ち, 充電中} \} = \begin{cases} \{x^{(i)}, 0, x^{(ii)}\} & (x^{(ii)} \leq s) \\ \{x^{(i)}, x^{(ii)} - s, s\} & (s \leq x^{(ii)}) \end{cases} \cdot \quad (1)$$

すなわち，ステーションのシステム状態は， $x^{(i)}, x^{(ii)}$ の 2 変数のみで記述できることが分かる．

さらに，バッテリー充電が各ステーションによって独自に行われる場合，バッテリー本数について以下の性質が成り立つ：

【バッテリー本数に関する性質 I】

バッテリー充電が各ステーションによって独自に行われる場合，ステーション内におけるバッテリーの総本数は常に一定である．

一見すると奇妙にも思えるが，EV はバッテリーの“交換”を行っているわけであり，交換作業によって，満充電済みのバッテリーが 1 本減る一方，空バッテリーが 1 本増えることを考えれば，ごく自然である．すなわち，ステーション内におけるバッテリー総本数を N とすれば

$$x^{(i)} + x^{(ii)} = N \quad (= \text{一定}) \quad (2)$$

なる関係式が成立する．この性質は，特にバッテリー在庫の定式化において重要となる．

3.2 バッテリー在庫の確率過程

以上の準備をした上で，ステーション内のバッテリー在庫の確率過程を，待ち行列ネットワーク・モデルを用いて定式化する．

保有する総バッテリー数が N ，充電設備のスロット数が s のバッテリー交換ステーションを考える．ここでは，ステーションはバッテリーを独自に充電し，また，バッテリーも高々 1 種類と仮定しよう．さらに，交換を希望する EV の到着間隔は，平均 $1/\lambda$ の指数分布に伴うポアソン到着とし，バッテリーの充電時間も平均 $1/\mu$ の指数分布に伴うものと仮定する．このとき，バッテリー交換ステー

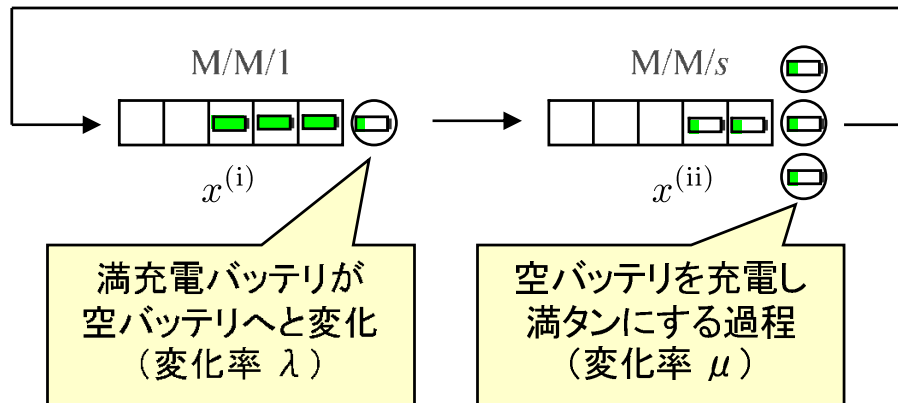


図 2 待ち行列ネットワークによるバッテリー交換ステーションの表現

ションにおける確率過程は，どのような待ち行列ネットワークとして記述できるだろうか．

いま，ステーション内で生じる事象を列挙してみると次の 3 通りである：

- (a) EV の到着 → 満充電済みのバッテリーと交換
変化率 λ で満充電済みのバッテリー数 $x^{(ii)}$ が 1 減少，充電フェーズのバッテリー数 $x^{(i)}$ が 1 増加．
- (b) EV の到着 → 満充電済みのバッテリーが無く，交換不可
満充電済みのバッテリー数 $x^{(ii)} = 0$ のとき呼損．
- (c) バッテリーの充電が完了
変化率 $\min\{x^{(i)}, s\}\mu$ で満充電済みのバッテリー数 $x^{(ii)}$ が 1 増加，充電フェーズのバッテリー数 $x^{(i)}$ が 1 減少．

以上のように整理すると，対応する待ち行列ネットワークは， $x^{(i)} \rightarrow x^{(ii)}$ を記述する M/M/1 待ち行列ノードと， $x^{(ii)} \rightarrow x^{(i)}$ を記述する M/M/s 待ち行列ノードからなる，1 連鎖閉鎖型待ち行列ネットワークとなることが分かる．図 2 に，本章における待ち行列ネットワークを示す．

当該ネットワークにおける確率過程は，よく知られているように定常分布と

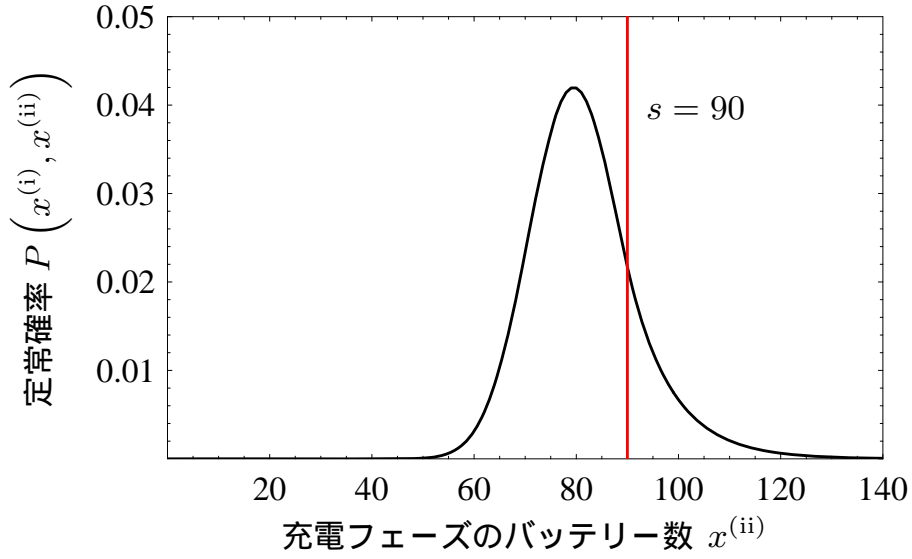


図3 待ち行列ネットワークの定常分布

して

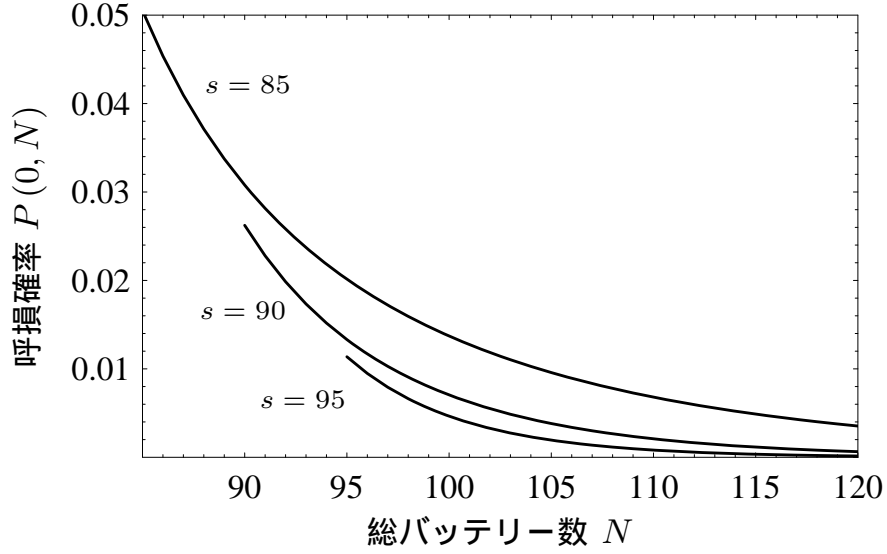
$$p\left(x^{(i)}, x^{(ii)}\right)=\begin{cases} G \cdot \frac{1}{x^{(ii)}!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{x^{(ii)}} & (0 \leq x^{(ii)} \leq s) \\ G \cdot \frac{s^s}{s!} \left(\frac{\lambda}{s\mu}\right)^{x^{(ii)}} & (s \leq x^{(ii)} \leq N) \end{cases} \quad (3)$$

$$G=\left(\sum_{x^{(ii)}=0}^s \frac{1}{x^{(ii)}!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{x^{(ii)}} + \frac{s^s}{s!} \sum_{x^{(ii)}=s+1}^N \left(\frac{\lambda}{s\mu}\right)^{x^{(ii)}}\right)^{-1} \quad (4)$$

を持つ [7, 9] . 図 3 に $P\left(x^{(i)}, x^{(ii)}\right)$ の概形を示す . ただし , $\lambda = 1/3$, $\mu = 1/240$, $s = 90$, $N = 140$ とした . なお , 本研究では単位時間として [分] を想定している .

3.3 呼損確率ならびに安全在庫の評価

前章の議論により , 交換ステーションにおけるバッテリー数の確率過程が定式化された . 本章では , これに基づき , ステーションにおける呼損の発生や , 安全在庫数などの評価を行う .

図4 総バッテリー数 N を変化させたときの呼損確率

まず，EV がステーションを訪問しても，バッテリーが交換できない事象，すなわち呼損が生じる確率を導出したい．上述のような事象が生じるのは，満充電済みのバッテリー数 $x^{(i)} = 0$ である場合に他ならない．したがって，呼損確率は

$$\begin{aligned}
 P(0, N) &= G \cdot \frac{s^s}{s!} \left(\frac{\lambda}{s\mu} \right)^N \\
 &= \frac{s^s}{s!} \left(\frac{\lambda}{s\mu} \right)^N \left(\sum_{x^{(ii)}=0}^s \frac{1}{x^{(ii)}!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^{x^{(ii)}} + \frac{s^s}{s!} \sum_{x^{(ii)=s+1}}^N \left(\frac{\lambda}{s\mu} \right)^{x^{(ii)}} \right)^{-1}
 \end{aligned} \tag{5}$$

で与えられる．図4・5に， N ならびに s を様々な値に変化させた場合の呼損確率の変化を示す ($\lambda = 1/3$, $\mu = 1/240$)．総バッテリー数 N や充電スロット数 s が多くなるほど，指数関数的に呼損確率が低下することが見て取れる．

次に，安全在庫数の導出について考える．具体的には前項で導出した呼損確率を，ある一定水準以下にするための条件について整理する．

いま呼損が生じる確率を δ 以下にするためには，(5) より以下の不等式が成り

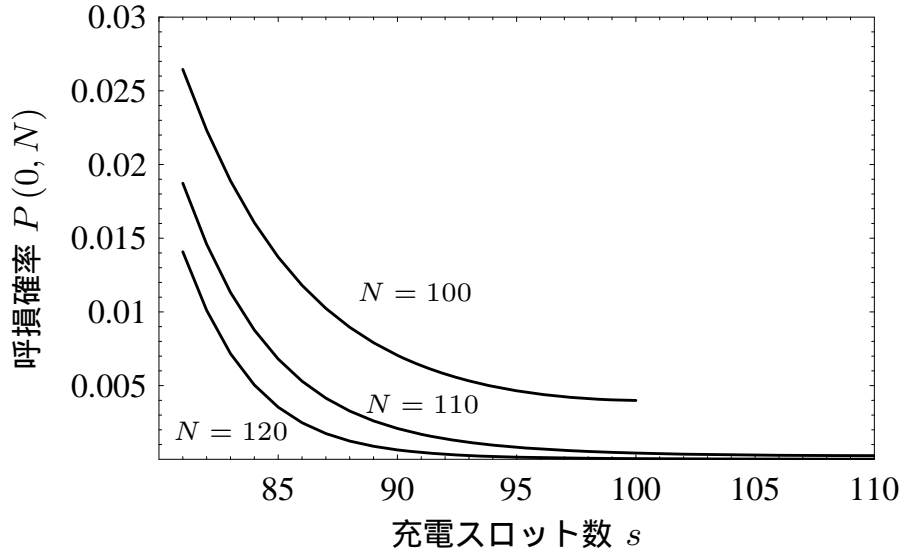


図5 充電スロット数 s を変化させたときの呼損確率 ($N = 110$)

立っていれば良い：

$$P(0, N) = \frac{s^s}{s!} \left(\frac{\lambda}{s\mu} \right)^N \left(\sum_{x^{(ii)}=0}^s \frac{1}{x^{(ii)}!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^{x^{(ii)}} + \frac{s^s}{s!} \sum_{x^{(ii)}=s+1}^N \left(\frac{\lambda}{s\mu} \right)^{x^{(ii)}} \right)^{-1} \leq \delta. \quad (6)$$

上記の不等式が，利用率 ρ と総バッテリー数 N ，そして充電設備数 s の関係式となる．

ここで，ステーションへの平均到着率の増加が安全在庫数に与える影響を考察しよう．具体的には，平均充電時間を $\mu = 1/240$ に固定し，また利用率がほぼ $\rho = 0.9$ となるようスロット数 s を設定した上で，呼損率が 0.1% 未滿となる安全在庫数 $N^*(\lambda)$ を数値的に解いた (図 6)．ステーションへの平均到着率が増加するにつれ，必要な安全在庫数がほぼ線形 (ただし，厳密には線形でないことに注意) に増えていることが確認できる．なお， $N^*(\lambda)$ を λ で線形回帰すると

$$N^*(\lambda) \doteq 62 + 242\lambda \quad (7)$$

を得る．すなわちバッテリーの平均充電時間を 4 時間とした場合，各ステーションでは最低でも 60 個前後のバッテリー在庫を保持しておく必要性が，以上の分析から判明する．

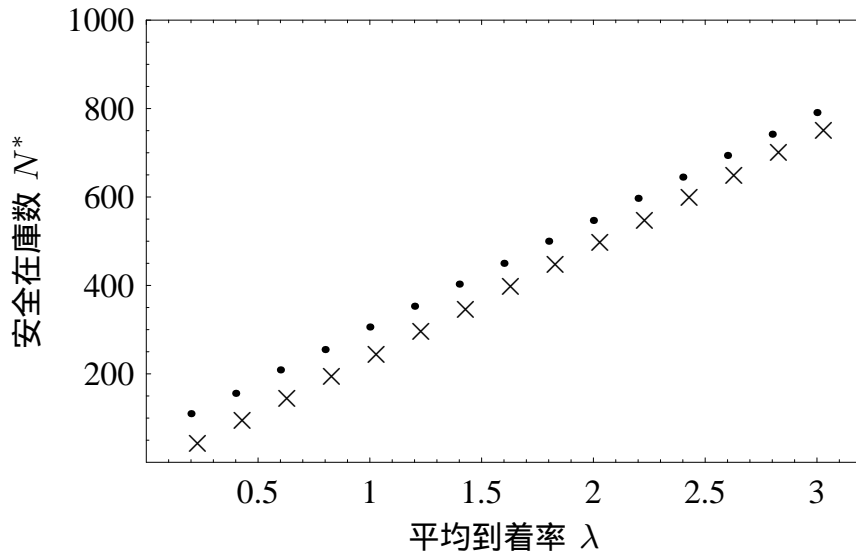


図 6 平均到着率を変化させたときの安全在庫数 $N^*(\lambda)$ ($\rho \doteq 0.9$)

4 複数種類のバッテリーを考慮した一般化

前章の議論から，バッテリー交換ステーションにおける確率過程が，待ち行列ネットワークとして定式化でき，その安全在庫数の評価が可能であることが判明した．本章では，前章のモデルを拡張し，複数種類のバッテリーを考慮した一般化について考察する．

4.1 システム状態の記述

まずは，バッテリー交換ステーションにおけるシステム状態を，如何に記述するかについて考察したい．前章ではステーション内における，(i) 満充電済みと，(ii) 充電フェーズの，バッテリー数 $x^{(i)}, x^{(ii)}$ を記述することによって，システムの状態を記述していた．本章で取り扱うのは，各ステーションで充電はしつつも，複数種類のバッテリーを取り扱う場合である．

異なる種類のバッテリーについて互換関係が無いのだから，各種類・状態ごとにバッテリー数を把握しておくことは必須であろう．そこで本研究では， K 種類のバッテリー ($k = 1, 2, \dots, K$) を考慮し，状態ごとにおける各種類のバッテリー数を $\boldsymbol{x}^{(*)} = \{x_1^{(*)}, x_2^{(*)}, \dots, x_K^{(*)}\}$ とベクトル表示する．このようにしておくと，

システムの状態は

$$\{\text{満充電済み, 充電フェーズ}\} = \{x^{(i)} \ x^{(ii)}\} \quad (8)$$

で与えられることになる．さらにバッテリーはステーション内で充電する訳だから，バッテリーの種類ごとに

$$x_k^{(i)} + x_k^{(ii)} = N_k (= \text{一定}) \quad \forall k \quad (9)$$

が成立する．すなわち，ステーション内におけるバッテリー数は各種類ごとに，常に一定である．

4.2 対応する待ち行列ネットワーク・モデル

以上の準備をした上で，ステーション内のバッテリー在庫の確率過程を，待ち行列ネットワーク・モデルを用いて定式化する．本章で想定するのは，ステーションはバッテリーを独自に充電するものの， K 種類のバッテリー ($k = 1, 2, \dots, K$) が存在する状況である．

保有する総バッテリー数が各種類ごとに N_1, N_2, \dots, N_K で与えられ，また充電設備のスロット数が s のバッテリー交換ステーションを考える．この充電設備はバッテリーの種類に因らず，共通で利用できるものとしておく^{*2}．交換を希望する EV の到着間隔は，各種類ごとに平均 $1/\lambda_k$ の指数分布に伴うポアソン到着としよう．一方，バッテリーの充電時間は全ての種類で共通とし，平均 $1/\mu$ の指数分布に伴うものと仮定する．このとき，バッテリー交換ステーションにおける確率過程は，どのような待ち行列ネットワークとして記述できるだろうか．

前章のモデル化では，“交換”によって $x^{(i)} \rightarrow x^{(ii)}$ に移行する部分が M/M/1 待ち行列ノードで，“充電”によって $x^{(ii)} \rightarrow x^{(i)}$ に移行する部分が M/M/ s 待ち行列ノードで表現していた．本章のモデルでは， K 種類のバッテリーを扱う訳であるから，“交換”を表現する M/M/1 待ち行列ノードは各種類ごとに必要となる．一方，充電設備は共有するので“充電”を表現する M/M/ s 待ち行列ノードは高々 1 個で良い．さらに，バッテリーは種類ごとに出入りする M/M/1 ノードが決まっており，(充電設備を意味する)M/M/ s ノードと行き来することになる．

^{*2} 仮に，充電設備が各種類ごとに個別に必要なのであれば，前章のモデルに基づき，各種類ごとに独立して在庫数を決定できる．

結果として，当該確率過程として考えるべき待ち行列ネットワークは，連鎖数が K で与えられ，かつ連鎖 k の移動経路行列が

$$R_k(i, j) = \begin{cases} 1 & ((i, j) = (k, K+1) \text{ or } (K+1, k)) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (10)$$

で表現されるものとなる．ここで，ノード k は，種類 k のための M/M/1 ノードを，ノード $K+1$ は充電のための M/M/s ノードである．図 7 に，本章における待ち行列ネットワークを示す．また，当該ネットワークにおける定常分布は以下の通り [7]：

$$P(x^{(i)}, x^{(ii)}) = \begin{cases} G \left\{ \prod_k \left(\frac{1}{\lambda_k} \right)^{x_k^{(i)}} \right\} \frac{1}{\prod_k x_k^{(ii)}!} \left(\frac{1}{\mu} \right)^{\|x_k^{(ii)}\|} & (0 \leq \|x_k^{(ii)}\| \leq s) \\ G \left\{ \prod_k \left(\frac{1}{\lambda_k} \right)^{x_k^{(i)}} \right\} \frac{\|x_k^{(ii)}\|!}{s! s^{\|x_k^{(ii)}\| - s} \prod_k x_k^{(ii)}!} \left(\frac{1}{\mu} \right)^{\|x_k^{(ii)}\|} & (s \leq \|x_k^{(ii)}\| \leq N) \end{cases} \quad (11)$$

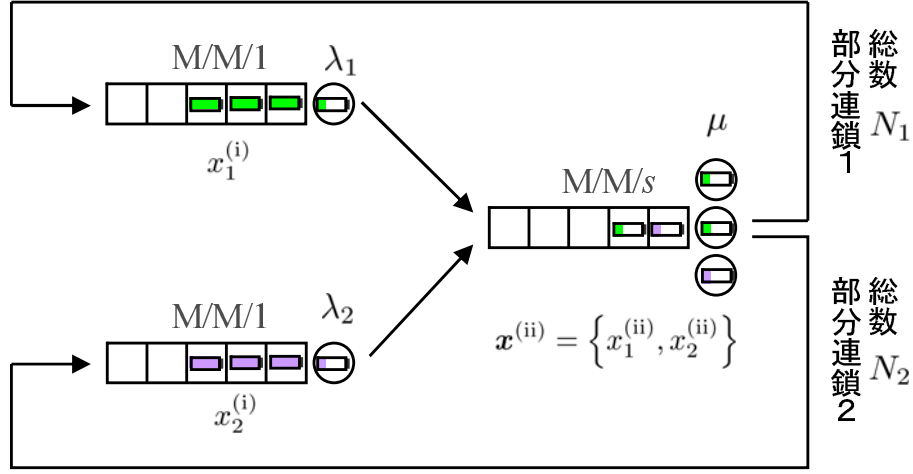
ここで， G は $\sum P(x^{(i)}, x^{(ii)}) = 1$ を満たすための調整係数である．

4.3 分析例

以上の定式化によって，複数種類のバッテリーが存在する状況における分析が可能となった．例えば，当該状況における呼損確率と安全在庫数であれば，前章と同様の議論によって簡単に導出できることは明らかである．すなわち，種類 k のバッテリーが個損する確率 $P_k^{\text{呼損}}$ は

$$P_k^{\text{呼損}} = \sum_{\{x^{(i)} \mid x_k^{(ii)} = 0\}} P(x^{(i)}, x^{(ii)}) \quad (12)$$

で与えられるし，安全在庫数については $P_k^{\text{呼損}} \leq \delta$ を満たす N_k を数値計算すれば良い．


 図 7 対応する待ち行列ネットワーク ($K = 2$ の場合)

さて，ここでは一例として，バッテリーの多種類化が社会に及ぼす影響について考察したい．EV の平均到着率が λ ，バッテリーの平均充電時間が $1/\mu$ ，充電スロット数が s ，また（例えばスペースや予算の制約上）保持可能なバッテリー総数が N で与えられるようなステーションを考える．ただし，EV の規格化が不十分だった結果，当該社会には 2 種類のバッテリーが存在し，その割合が“種類 1：種類 2 = $\alpha : 1 - \alpha$ ”であるとしよう．すなわち， $\lambda_1 = \alpha\lambda$ ， $\lambda_2 = (1 - \alpha)\lambda$ である．このような状況下では，ステーション側もそれぞれのバッテリーのため，別個に在庫を用意しておく必要がある．では，各種類ごとに一体どれだけの在庫を用意しておくべきだろうか．

ステーションが取るべき戦略は，各種類の割合 α に応じて，適切に持ち得るバッテリー N を種類 1 と種類 2 に振り分けることであろう．そして，その評価基準は個損確率の最小化としておけば，とりあえずは自然と思われる．以上のアイディアにしたがい，次の最適化問題を考えてみる：

$$\begin{aligned} \min_{N_1, N_2} \quad & \alpha P_1^{\text{呼損}} + (1 - \alpha) P_2^{\text{呼損}} \\ \text{s.t.} \quad & N_1 + N_2 = N \end{aligned} \quad (13)$$

$\lambda = 1/3$ ， $\mu = 1/240$ ， $s = 85$ ， $N = 100$ と置き，当該問題を数値的に解いた結果を図 8 に示す．これを見ると， $\alpha = 0.5$ のとき，すなわち各種類のバッテリーがちょうど半々ずつ社会に普及しているとき，呼損確率が最大となっていることが

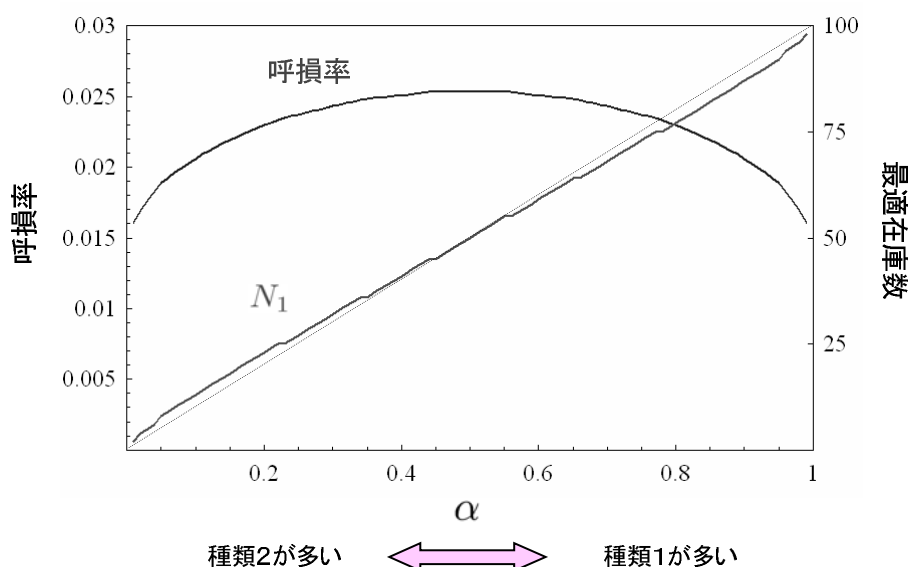


図 8 複数種類のバッテリーの普及比率に応じた呼損確率

分かる．そして，その値はいずれか一方のみの場合 ($\alpha = 0$ or 1) に比べ，おおよそ 1.5 倍程度にも達する．以上の分析より，バッテリー交換方式において多種類のバッテリーが存在する状況は，(充電設備の対応など) ステーション側の負担という意味でも，(個損確率という) ドライバーへのサービスという意味でも好ましくないことが判明する．

5 充電専用施設を考慮した一般化

これまでの議論では，各ステーションが独自に充電するものと仮定し，充電施設が 1 ヶ所のみの状況を想定していた．これに対し，第 2.4 章で議論したように，敷地の制約や将来的なチェーン展開の結果，自前の充電設備で充電することなく，他の充電専用施設へバッテリーを輸送した上で，ステーションが運営を行うことも，考え得る．そこで本章では，複数のステーションが共通で利用しうる充電専用施設を考慮した一般化について考察する．

5.1 システム状態の記述

これまでと同様，まずはバッテリー交換ステーションにおけるシステム状態を，どのように記述するか考える．前章ではステーション内における，(i) 満充電済みと，(ii) 充電フェーズの，各バッテリー数を記述することによって，システムの状態を記述していた．これに対し，本章で拡張すべきは，各ステーションで充電することなく，専用充電施設へ輸送し，充電されるバッテリーの存在である．これを明示的に考慮するためには，充電フェーズのバッテリーを“ステーション内で充電”するのか，“施設で充電”するのかで分類することが有効と思われる．以上を踏まえ，本研究ではバッテリーを (i) 満充電済み，(ii) ステーション内充電，(iii) 施設充電の 3 つに分類し，システム状態の記述を行う．

いま，(単純化のために)2 つのバッテリー交換ステーション A, B を考え，さらに 2 ステーションが共通で利用できる充電専用施設 C が存在するものとしよう^{*3}．本章で想定するのは， A, B 両ステーションは自前の充電設備も有しているものの，規模が不十分のため，回収した一部の空バッテリーを充電専用施設 C に輸送した上で，充電している状況である．以上のようなシステムの状態を記述するため，本研究では，各々のステーションのバッテリー数を $x^{(*)} = \{x_A^{(*)}, x_B^{(*)}\}$ と記述した上で．

$$\{\text{満充電済み, ステーション内充電, 施設充電}\} = \{x^{(i)}, x^{(ii)}, x^{(iii)}\} \quad (14)$$

で与える．さらに，バッテリーは施設 C を介した A, B 間でのバッテリーのやり取りは行われないものと仮定すると，各ステーション保有のバッテリーごとに

$$x_l^{(i)} + x_l^{(ii)} + x_l^{(iii)} = N_l (= \text{一定}) \quad l = A, B \quad (15)$$

が成立する．

5.2 待ち行列ネットワーク・モデルの構築

以上の仮定の下，ステーション A, B ，充電専用施設 C から成るシステムを，待ち行列ネットワーク・モデルを用いて定式化したい．

^{*3} なお，第 4 章で取り扱ったバッテリーの種類については，ここでは無視するものとする．

保有する総バッテリー数が各ステーションごとに N_A, N_B で与えられ，また充電設備のスロット数が s_A, s_B のバッテリー交換ステーションを考える．加えて，ステーション A, B が共通で利用できる充電専用施設 C を考え（スロット数は s_C ），この充電設備はバッテリーの種類に因らず，共通で利用できるものとしておく．交換を希望する EV の到着間隔は，各ステーションごとに平均 $1/\lambda_A, 1/\lambda_B$ の指数分布に伴うポアソン到着としよう．一方，バッテリーの充電時間はそれぞれ，平均 $1/\mu_A, 1/\mu_B, 1/\mu_C$ の指数分布に伴うものと仮定する．このような，バッテリー交換網を考えたとき，対応する待ち行列ネットワークはどのようなになるだろうか．

これまでのモデル化から，“交換”を表現するのは M/M/1 待ち行列ノードで，“充電”を表現するのは M/M/s 待ち行列ノードとすればよいことが分かる．本章では，2 つのステーション（交換ノードと充電ノードが 1 つずつ）と，1 つの充電専用施設（充電ノードが 1 つ）を取り扱うので，計 5 ノードから構成される待ち行列ネットワークを考えることになるろう．さらに，施設 C で充電したバッテリーは，必ず送られてきた元のステーションに戻るものとする，考えるべき待ち行列ネットワークは，連鎖数が 2 で，移動経路行列が

$$R(A) = \begin{pmatrix} 0 & r_A^H & 0 & 0 & r_A^C \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$R(B) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_B^H & r_B^C \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

で与えられるネットワークとなる．ただし，ノード番号との対応関係は表 2 の通りであり，さらに r_l^H と r_l^C は，ステーション l から自身の充電設備に送る割合と，施設に送る割合を意味する．図 9 に，本章における待ち行列ネットワークを示す．

表 2 ノードと施設の対応関係

番号	役割
ノード 1	ステーション A での “交換”
ノード 2	ステーション A での “充電”
ノード 3	ステーション B での “交換”
ノード 4	ステーション B での “充電”
ノード 5	専用施設 C での “充電”

当該ネットワークにおける定常分布は以下の通りである：

$$P\left(\boldsymbol{x}^{(i)}, \boldsymbol{x}^{(ii)}, \boldsymbol{x}^{(iii)}\right) = G\left(\frac{1}{\lambda_A}\right)^{x_A^{(i)}} \left(\frac{1}{\lambda_B}\right)^{x_B^{(i)}} q_A\left(x_A^{(ii)}\right) q_A\left(x_B^{(ii)}\right) q_C\left(\boldsymbol{x}^{(iii)}\right). \quad (18)$$

ただし，

$$q_A\left(x_A^{(ii)}\right) = \begin{cases} \frac{1}{x_A^{(ii)}!} \left(\frac{r_A^H}{\mu_A}\right)^{x_A^{(ii)}} & \left(0 \leq x_A^{(ii)} \leq s_A\right) \\ \frac{x_A^{(ii)}!}{s_A! s_A^{x_A^{(ii)} - s_A} x_A^{(ii)}!} \left(\frac{r_A^H}{\mu_A}\right)^{x_A^{(ii)}} & \left(s_A \leq x_A^{(ii)} \leq N_A\right) \end{cases} \quad (19)$$

$$q_B\left(x_B^{(ii)}\right) = \begin{cases} \frac{1}{x_B^{(ii)}!} \left(\frac{r_B^H}{\mu_B}\right)^{x_B^{(ii)}} & \left(0 \leq x_B^{(ii)} \leq s_B\right) \\ \frac{x_B^{(ii)}!}{s_B! s_B^{x_B^{(ii)} - s_B} x_B^{(ii)}!} \left(\frac{r_B^H}{\mu_B}\right)^{x_B^{(ii)}} & \left(s_B \leq x_B^{(ii)} \leq N_B\right) \end{cases} \quad (20)$$

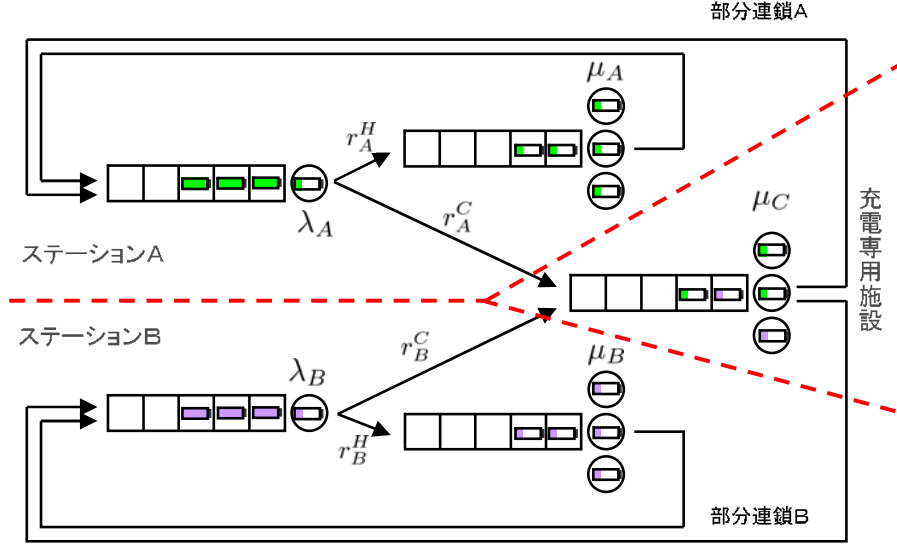


図9 充電専用施設を考慮した待ち行列ネットワーク

$$q_C(\mathbf{x}^{(iii)}) = \begin{cases} \frac{1}{x_A^{(iii)}! x_B^{(iii)}!} \left(\frac{r_A^C}{\mu_C}\right)^{x_A^{(iii)}} \left(\frac{r_B^C}{\mu_C}\right)^{x_B^{(iii)}} & (0 \leq x_A^{(iii)} + x_B^{(iii)} \leq s_C) \\ \frac{(x_A^{(iii)} + x_B^{(iii)})!}{s_C! s_C^{x_A^{(iii)} + x_B^{(iii)} - s_C} x_A^{(iii)}! x_B^{(iii)}!} \left(\frac{r_A^C}{\mu_C}\right)^{x_A^{(iii)}} \left(\frac{r_B^C}{\mu_C}\right)^{x_B^{(iii)}} & (s_C \leq x_A^{(iii)} + x_B^{(iii)} \leq N_A + N_B) \end{cases} \quad (21)$$

であり, また G は $\sum P(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(ii)}, \mathbf{x}^{(iii)}) = 1$ を満たすための調整係数である.

5.3 分析例

当該状況における呼損確率と安全在庫数も, これまでと同様の議論によって導出できる. すなわち, ステーション l のバッテリーが個損する確率 $P_l^{\text{呼損}}$ は

$$P_l^{\text{呼損}} = \sum_{\{\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(ii)}, \mathbf{x}^{(iii)} | x_l^{(i)} = 0\}} P(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(ii)}, \mathbf{x}^{(iii)}) \quad (22)$$

で与えられるし，安全在庫数については $P_l^{\text{呼損}} \leq \delta$ を満たす N_l を数値計算すれば良い．

最後に，充電施設の導入が呼損確率に与える影響について考察しよう．そもそも，待ち行列理論において窓口を統合する効果を考えたとき，輸送の手間が無視できるのであれば，(同じスロット数ならば) 全ての充電設備を一箇所に集め，充電専用施設のみでバッテリーを充電することが最適なはずである．ただし，実際には，本章で取り上げたように，ステーション，専用施設の両方でバッテリーを充電することがほとんどであろう．この際には，ステーションでの充電能力と，専用施設の充電能力を加味し，適切にバッテリーの割り振り，すなわち r_l^H と r_l^C を決定する必要がある．

ステーション側が取るべき戦略は，ステーション全体での呼損確率の最小化であろうから，これは以下の最適化問題となる：

$$\begin{aligned} \min_{r_A^H, r_B^H} \quad & \lambda_A P_A^{\text{呼損}} + \lambda_B P_B^{\text{呼損}} \\ \text{s.t.} \quad & r_A^H + r_A^C = 1 \\ & r_B^H + r_B^C = 1 \end{aligned} \tag{23}$$

前述のように，当該問題の最適解はステーションと専用施設，それぞれの充電能力に依存する．そこで，ここでは， $\mu_A = \mu_B = \mu_C$ ， $s_A + s_B + s_C = \text{一定}$ と置き，純粋にスロットの統合がもたらす影響について考察したい．ステーション A, B も同等規模のステーションと考え， $\lambda_A = \lambda_B$ ， $s_A = s_B$ という条件の下，専用充電施設の規模 s_C を様々に変化させながら，当該問題を数値的に解いた結果を図 10 に示す．ただし， $\lambda = 1/3$ ， $\mu = 1/240$ ， $s_A + s_B + s_C = 170$ ， $N_A = N_B = 100$ と置き，また $r_A^H = r_B^H = r_H$ を意味している．これを見ると，ステーションと施設へのバッテリーの割り振りについては，それぞれの規模に応じて，ほぼ線形に割り振れば良いことが分かる．さらに注目すべきは，呼損確率の変化であり，図 10 を見ると， $s_C = 70$ 付近で呼損確率が最大となっているが，この付近では，ステーション A, B と専用充電施設それぞれの充電能力(スロット数)が，同等に分散されてしまっている．すなわち，呼損確率を少なくするためには，ステーションか充電施設の，どちらか一方に充電能力を集中させることが，有効であることが示唆される．

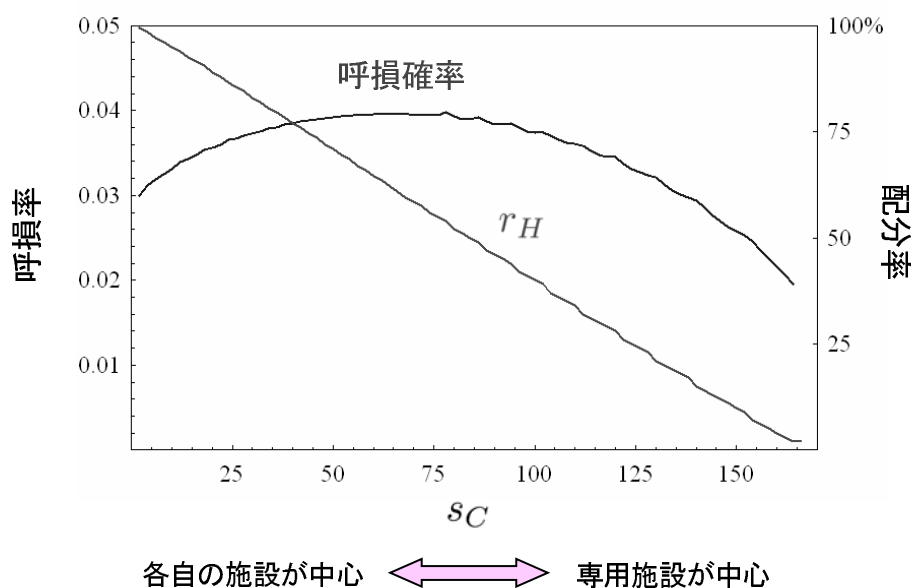


図 10 充電施設規模に応じた呼損率の変化

6 まとめ

本研究では，EV の支援インフラとして，バッテリー交換ステーションを想定した上で，バッテリー在庫という観点から，その適切な運用形態を評価することを試みた．具体的にはバッテリー交換ステーション内における，バッテリーの管理を待ち行列ネットワーク・モデルを用いて定式化し，バッテリーの呼損率や安全在庫の導出方法について考察を行った．また，複数種類のバッテリーの考慮や，充電専用施設の導入などへの一般化も試みた．本研究で得られた主な知見は次の通りである：

- バッテリー交換ステーションにおけるバッテリー数の確率過程は待ち行列ネットワーク・モデルで記述できる．
- バッテリーの平均充電時間が 4 時間のとき，各ステーションにおけるバッテリーの安全在庫数は，車両の到着率を λ [台/分] とすると，およそ $60 + 242\lambda$ 個で見積もられる．
- 複数種類のバッテリーが社会に混在することによって，バッテリーの交換

ができない“呼損確率”が増加する．

- ステーションの運営をサポートする充電専用施設を導入しても，場合によっては呼損確率を悪化させることがあるので，施設能力の設定やバッテリーの在庫管理などを，慎重に行う必要がある．

今後の課題としては，バッテリー交換方式に対する，都市全体を見据えた最適なシステム運営形態の更なる分析・評価などが挙げられるであろう．

参考文献

- [1] ベタープレイス・ジャパン (2010) : better place Web Page , ベタープレイス・ジャパン .
<http://japan.betterplace.com/>
- [2] 船瀬俊介 (2004) : 奔れ！電気自動車，築地書館．
- [3] Y. Honma, O. Kurita(2007) : A Mathematical Model on the Optimal Number of Hydrogen Stations with Respect to the Diffusion of Fuel Cell Vehicles, Journal of the Operations Research Society of Japan, Vol.51-2, pp.166–190.
- [4] 飯塚昭三 (2006) : 燃料電池車・電気自動車の可能性，グランプリ出版．
- [5] International Energy Agency(2004) : World energy outlook 2004, OECD.
- [6] 次世代自動車振興センター (2010) : 次世代自動車振興センター Web Page , 次世代自動車振興センター . <http://www.cev-pc.or.jp/>
- [7] 紀 一誠 (2002) : 待ち行列ネットワーク，朝倉書店．
- [8] J.J. MacKenzie(2000) : Oil as a finite resource: When is global production likely to peak?, World Resources Institute.
- [9] 森村英典，大前義次 (1975) : 応用待ち行列理論，日科技連．
- [10] Shai Agassi(2009) : 世界のキーマンに聞く，週刊東洋経済，3 月 21 日号，p.50．
- [11] P. Roberts(2004) : The end of oil: On the edge of a perilous new world, Houghton Mifflin.
- [12] 全国石油商業組合連合会 (2010) : 次世代自動車対応 S S の将来像を考える研究会 報告書，全石連．